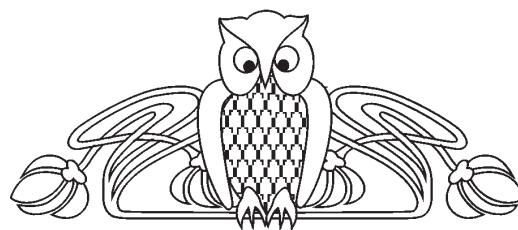




УДК 343.9

Выявление схожих изображений следов патронного упора методом корреляционных ячеек

К. О. Сорокина, В. А. Федоренко, П. В. Гиверц



Сорокина Ксения Олеговна, аспирант кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., lorredos@gmail.com

Федоренко Владимир Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией криминалистического материаловедения, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, fed77@yandex.ru

Гиверц Павел Витальевич, эксперт-баллист, заслуженный член АФТЕ, Баллистическая лаборатория криминалистического управления полиции Израиля, Иерусалим, pavel.giverts@gmail.com

Введение. Актуальной задачей судебно-баллистической идентификации является исследование следов патронного упора на стреляных гильзах. В работе рассматривается сравнение изображений следов патронного упора методом корреляционных ячеек. **Теоретический анализ.** Схожесть изображений исследуемых следов можно установить методом корреляционного анализа. Однако данный способ малоэффективен, поскольку доминирующее влияние на коэффициент корреляции оказывают области, не содержащие полезной информации. Для повышения эффективности корреляционного анализа Дж. Сонгом был предложен метод последовательно совпадающих ячеек. Метод корреляционных ячеек разработан на основе данного метода. В работе представлен алгоритм метода, разбитый на основные этапы. Первый этап включает в себя предварительную обработку изображения и разбиение на ячейки. Второй этап – построение распределения максимумов коэффициентов корреляции. Третий этап представляет собой установление факта наличия кластера на графике этого распределения. Четвертый этап позволяет выделить области, пригодные для дальнейшей работы. Методика выделения областей, не содержащих следов патронного упора, основана на нахождении функции автокорреляции. На пятом этапе рассчитывается окончательное значение коэффициента корреляции без учета областей анализируемых изображений, не содержащих полезной информации. **Экспериментальные исследования.** В качестве критериев схожести следов патронного упора были предложены два условия: первое – это высокое значение коэффициента корреляции, второе – наличие кластера на графике распределения максимумов коэффициентов корреляции. Установление этого факта основано на определении коэффициента правдоподобия. **Заключение.** Метод корреляционных ячеек позволил повысить эффективность корреляционного анализа. В ходе выполнения работы были определены критерии отнесения следов к категории схожих.

Ключевые слова: следы патронного упора, метод корреляционных ячеек, СМС метод, корреляционный анализ, коэффициент правдоподобия.

Поступила в редакцию: 17.11.2019 / Принята: 10.01.2020 / Опубликовано: 01.06.2020

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

DOI: <https://doi.org/10.18500/1994-2540-2020-20-2-203-209>

Введение

Важной задачей судебной баллистики является идентификация огнестрельного оружия по следам на стреляных гильзах. Основным типом идентифицируемых следов при этом являются следы бойка. Однако наряду с ними определенной информативностью обладают и следы патронного упора, отображающиеся на капсюле. Целью данной работы является разработка алгоритма установления схожести этих следов.

Одной из методик выявления схожих изображений следов патронного упора является метод последовательно совпадающих ячеек (СМС) Джона Сонга, описанный в работах [1, 2]. Этот метод представляет собой разбиение изображения на ячейки и последующую подстройку каждой отдельной ячейки по углу и координате в положение ее максимального совмещения со сравниваемым изображением. Среди массива ячеек выделяются последовательно совпадающие. Затем в зависимости от количества последовательно совпадающих ячеек делается окончательный вывод о схожести или различии изображений.

Метод корреляционных ячеек [3] базируется на методе Дж. Сонга. Здесь также присутствуют разбиение на ячейки и последующая подстройка ячейки по координате. Однако в данном методе учитывается не количество последовательно совпадающих ячеек, а их сдвиг относительно начального положения при подстройке. Строится диаграмма сдвигов и при наличии на ней кластера делается вывод о схожести сравниваемых изображений.

Теоретический анализ

Объектом исследования в данной работе являются следы патронного упора, образующиеся на капсюле гильзы в процессе выстрела. В зави-



симости от структуры поверхности патронного упора могут возникать следы в виде полос, дуг, колец и пятен неопределенной формы [4].

Корреляционный анализ. Установить схожесть изображений следов патронного упора можно с помощью функции взаимной корреляции. Принцип корреляции можно представить следующим образом. Возьмем два изображения F и G с осями координат пикселей i и j . Коэффициент корреляции K рассчитывается по следующей формуле:

$$K = \frac{\sum(F_{i,j}-F_s)*(G_{i,j}-G_s)}{\sqrt{\sum(F_{i,j}-F_s)^2*\sum(G_{i,j}-G_s)^2}}, \quad (1)$$

где $F_{i,j}$, $G_{i,j}$ – яркость пикселей 1-го и 2-го изображений соответственно; F_s , G_s – средняя яркость всех пикселей 1-го и 2-го изображений соответственно.

Функция взаимной корреляции $K(x,y)$ определяется следующим образом:

$$K(x, y) = \frac{\sum(F_{i,j}-F_s)*(G_{i,j}(x,y)-G_s(x,y))}{\sqrt{\sum(F_{i,j}-F_s)^2*\sum(G_{i,j}(x,y)-G_s(x,y))^2}}, \quad (2)$$

где x, y – сдвиг одного изображения относительно другого. В данном случае одно из изображений дополнительно сдвигается относительно другого по осям x и y , фиксируя получаемый коэффициент корреляции при каждом сдвиге. По этим значениям и строится график функции корреляции (рис. 1) [5].

Обычно с помощью корреляции сравнивают изображения «в лоб», т. е. в корреляции участвуют все пиксели изображения. Но если необходимо сопоставить только следы патронного упора, то нет смысла коррелировать вместе с ними след боя, маркировку и поверхность гильзы вне капсюля. Эти области разумно будет исключить из корреляции. Однако даже при такой предварительной обработке изображений функция корреляции не всегда позволяет верно установить схожесть следов. Так, для некоторых непарных изображений корреляция может достигать значений порядка 0,25. Такое значение для непарных изображений является достаточно высоким. В то же время некоторые парные изображения могут коррелировать с аналогичным значением коэффициента. Такой эффект может быть обусловлен присутствием в следе патронного упора посторонних включений, таких как неоднородности поверхности капсюля, связанные с производственной обработкой.

СМС метод. Для повышения эффективности корреляционного анализа Дж. Сонгом был предложен СМС метод, который заключается в следующем. Изображения приводятся в позицию их максимального совпадения. Область боя и область вне капсюля удаляются. Затем одно из изображений разбивается на ячейки. Пустые ячейки и ячейки с малым количеством информации признаются непригодными и удаляются из изображения. Затем берется одна из пригодных

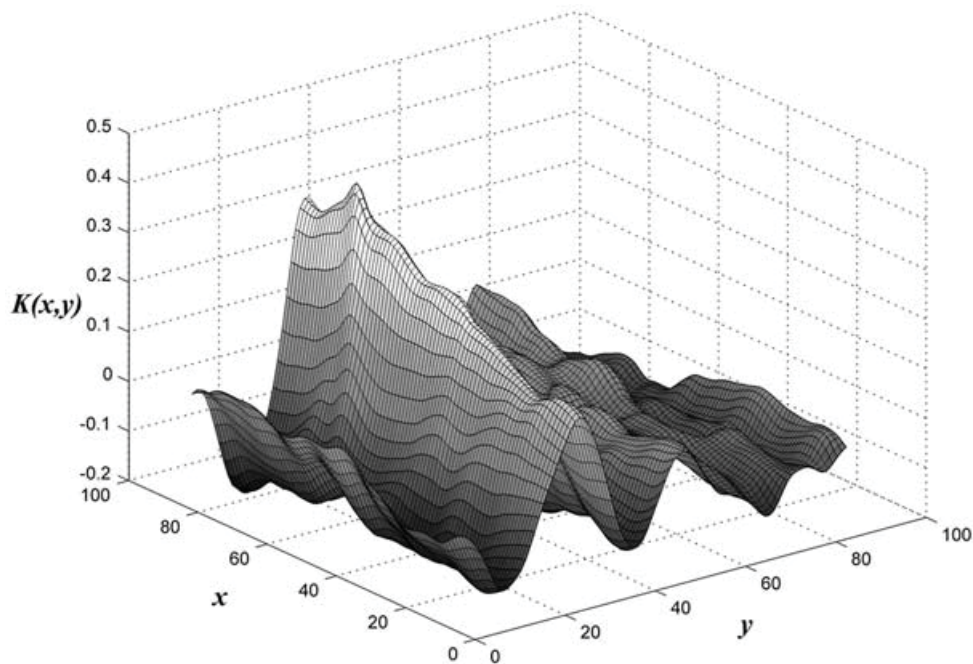


Рис. 1. График функции корреляции
Fig. 1. Graph correlation function



ячеек тестового изображения, сдвигается по исследуемому изображению, и при каждом сдвиге считается коэффициент корреляции. Исследуемое изображение поворачивается на 1 градус, и ячейка опять сдвигается по нему. Таким образом, пройдя все углы, ячейка находит позицию, при которой значение корреляции максимально. Этот максимум, а также значения сдвига и угла, при котором он наблюдался, определяются и заносятся в таблицу для каждой ячейки. Затем определяется количество последовательно совпадающих ячеек. Это ячейки, вышеуказанные параметры которых не выходят за установленные предельные значения. Количество последовательно совпадающих ячеек и является итоговым показателем парности или непарности следов. Если количество ячеек больше 6, изображения признаются парными, в противном случае они считаются непарными [1, 2].

Метод корреляционных ячеек. Как уже упоминалось ранее, метод корреляционных ячеек основывается на методе Дж. Сонга, но обладает рядом отличий. Модель предлагаемого метода несколько проще, так как здесь не производится дополнительная подстройка ячеек по углу. Также метод корреляционных ячеек позволяет

исключить из корреляционного анализа все области, не содержащие следов патронного упора. К тому же схожесть следов здесь определяется коэффициентом корреляции и фактом наличия кластера. Применение автокорреляции в методе корреляционных ячеек позволяет отбросить области, не содержащие каких-либо яркостных неоднородностей. Рассмотрим метод корреляционных ячеек подробнее.

На первом этапе проводится предварительная обработка. Изображения одинаково ориентируются и масштабируются, а также производится заливка черным цветом крупных областей, не содержащих следов патронного упора (рис. 2, а). Все области, залитые черным цветом, впоследствии не будут участвовать в корреляции. Помимо этого, проводится выравнивание освещения на изображениях для исключения засветок и их размытие для сглаживания шумов [6].

Затем тестовое изображение разбивается на сетку 10×10 ячеек. При этом все ячейки проверяются на условие пригодности к корреляции. В данной работе пригодными считаются те ячейки, которые содержат более 50% информативных пикселей (не черных). На рис. 2, б представлено изображение после исключения непригодных ячеек.



а/а



б/б

Рис. 2. Изображение патронного упора после предварительной обработки (а) и исключения непригодных ячеек (б)

Fig. 2. The image of breech face after pre-processing (a) and the exclusion of invalid cells (b)

Далее устанавливается факт наличия кластера. Для этого исследуемое изображение дополняется по краям черными пикселями, чтобы обеспечить его движение под сеткой. Сетка ячеек с тестового изображения накладывается на исследуемое. Каждая ячейка первого изображения коррелирует с соответствующей ей по сетке ячейкой второго изображения. Затем исследуемое

изображение под сеткой сдвигается, и операция корреляции проводится вновь. В итоге для каждой ячейки определяется позиция изображения, при которой коэффициент корреляции максимален. Значения сдвига изображения под сеткой по осям и максимума коэффициента заносятся в матрицы.

По полученным матрицам сдвигов строится график распределения максимумов корреляции



(рис. 3). Координаты максимумов соответствуют сдвигам изображения, при которых эти максимумы наблюдаются. Цвет точки на графике соответствует количеству максимумов, попавших в эту точку. Распределение на рис. 3, *а* соответствует ситуации корреляции парных следов. На гра-

фике присутствует скопление точек — кластер. На рис. 3, *б* представлен график распределения максимумов коэффициентов корреляции для непарных следов. Скопления точек на графике не наблюдается, максимумы распределены равномерно.

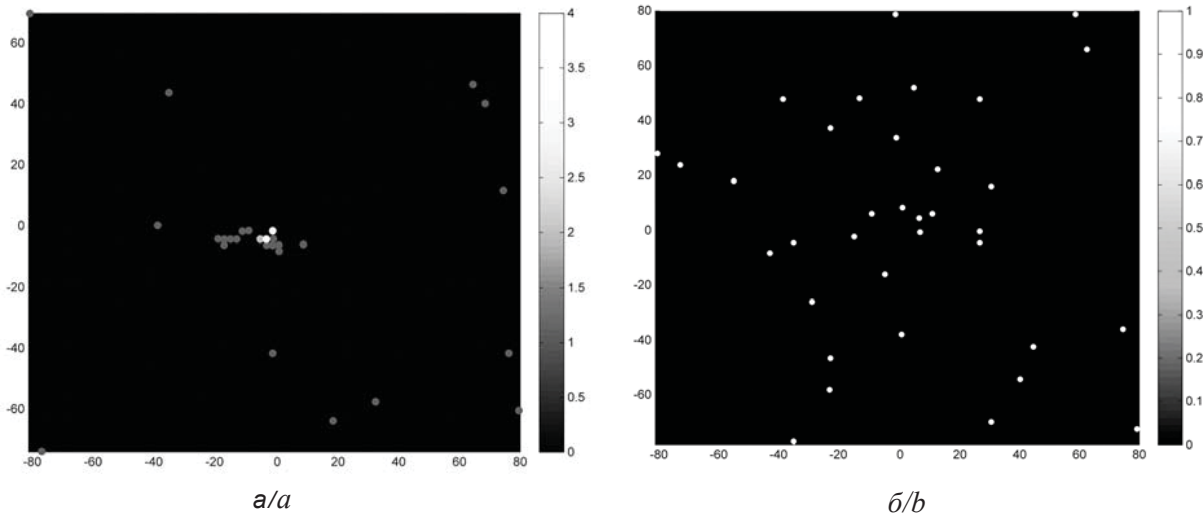


Рис. 3. График распределения максимумов коэффициентов корреляции для парных следов (*а*) и для непарных следов (*б*)
Fig. 3. The distribution graph of the correlation coefficients maximum for matching impressions (*a*) and for non-matching impressions (*b*)

Теперь рассмотрим, каким образом определяется наличие кластера на графике. Для этого берется квадратная маска, равная по площади $1/9$ изображения. С ее помощью изображение сканируется и на каждом шаге маски фиксируется количество максимумов коэффициентов корреляции, попавших в ее область. Скопление на графике характеризуется максимальным числом точек, попавших под маску. Так, для графика, представленного на рис. 3, *а* это количество равно 23 максимумам. Эти точки составляют приблизительно 67% от общего количества точек. Экспериментально установлено, что если количество точек превышает 45%, то это скопление можно считать кластером. Наличие кластера говорит о сходстве структур изображений и, как следствие, их парности.

Ячейки, максимумы корреляции которых не попали в кластер, по-видимому, включают в себя какой-то дефект поверхности, не связанный со следом патронного упора. То же самое относится и к ячейкам с коэффициентом корреляции ниже 0,1. Эти ячейки признаются непригодными и исключаются из изображения.

Предыдущие операции позволили максимально исключить дефекты поверхности капсюля, не связанные со следами патронного упора. Для того чтобы исключить из процесса корреля-

ции ячейки, не содержащие вообще каких-либо ярких неоднородностей, в данном методе применяется автокорреляция.

Автокорреляция представляет собой корреляцию изображения с самим собой [5]. В результате автокорреляции каждой отдельной ячейки полученные графики можно разделить на два типа. На рис. 4, *а* показана функция автокорреляции для ячейки с признаком. На графике присутствует область высоких значений коэффициента корреляции, вытянутая вдоль оси признака. Для ячейки без признака график выглядит иначе (рис. 4, *б*). Область высоких значений коэффициента корреляции сжата к центру. Ячейки со вторым типом графиков автокорреляции исключаются из изображения.

В результате всех предыдущих этапов следы патронного упора максимально выделены, и теперь можно провести итоговую корреляцию общих пригодных областей изображений (областей, которые содержат информативные пиксели и на тестовом, и на исследуемом изображениях). Итоговое значение корреляции соответствует максимуму полученного графика функции корреляции.

Экспериментальные исследования

Критерии схожести. По результатам проведенных исследований были получены два

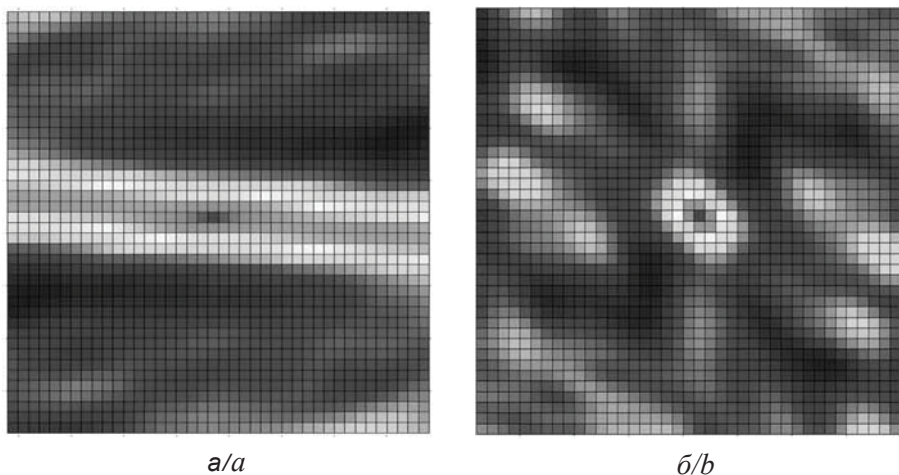


Рис. 4. Функция автокорреляции для ячейки с признаком (а) и без признака (б)
 Fig. 4. Autocorrelation function for a cell with mark (a) and without mark (b)

критерия схожести изображений следов: наличие кластера и значение коэффициента корреляции. Кластером считалось скопление точек в количестве, превышающем 45%. Для того чтобы определить этот порог, в ходе работы было проанализировано 34 и 47 пар изображений совпадающих и несовпадающих следов соответственно. Для каждой пары определялось наибольшее число максимумов коэффициентов корреляции, попадающих под маску, и исходя из этого вычислялась частота встречаемости максимального числа точек под маской для совпадающих и несовпадающих следов. По значениям частоты была рассчитана плотность вероятности концентрации максимального числа максимумов коэффициентов корреляции в области кластера и построено ее распределение (рис. 5, а). Распределение имеет биномиальный характер и поэтому определяется следующими формулами:

$$P_{i(KM)} = (\lambda_{KM}^i * e^{-\lambda_{KM}}) / i!, \quad (3)$$

$$P_{i(KNM)} = (\lambda_{KNM}^i * e^{-\lambda_{KNM}}) / i!,$$

где $P_{i(KM)}$, $P_{i(KNM)}$ – плотность вероятности для пар совпадающих и несовпадающих изображений соответственно; λ_{KM} , λ_{KNM} – среднее значение максимального числа максимумов корреляции для пар совпадающих и несовпадающих изображений соответственно; i – число максимумов.

Коэффициенты правдоподобия [7] для гипотез, что следы являются совпадающими и несовпадающими, определялись по следующим формулам:

$$L_{KM} = P_{i(KM)} / P_{i(KNM)}, \quad (4)$$

$$L_{KNM} = P_{i(KNM)} / P_{i(KM)},$$

где L_{KM} , L_{KNM} – коэффициенты правдоподобия для пар совпадающих и несовпадающих

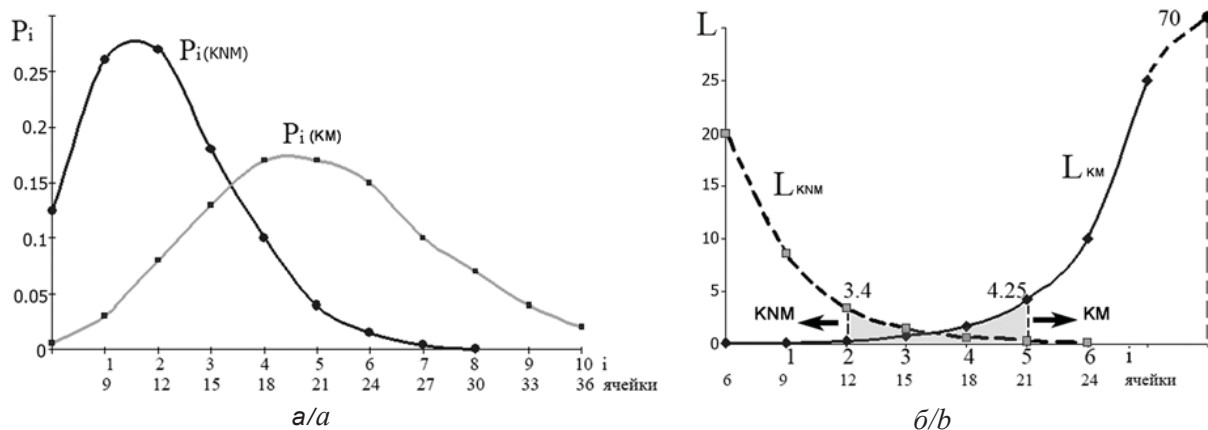


Рис. 5. Распределение плотности вероятности (а) и распределение коэффициентов правдоподобия (б) для совпадающих и несовпадающих следов

Fig. 5. The distribution of probability density (a) and the distribution of likelihood coefficients (b) for matching and non-matching impressions



изображений соответственно. На рис. 5, б показан график распределения коэффициентов правдоподобия в зависимости от числа точек под маской. Из графика видно, что в качестве пределов разделения следов на совпадающие и несовпадающие могут выступать значения 12 и 21 по количеству точек и соответственно 25 и 45% от общего количества. То есть количество точек ниже 25% говорит об отсутствии кластера, что характерно для несовпадающих следов. Если количество точек выше 45%, то это показывает наличие кластера, что характерно для совпадающих следов. Область посередине – это область некоторой неопределенности, когда нельзя с уверенностью сказать, совпадают или не совпадают следы. В этом случае требуется провести дополнительный анализ.

Таким образом, мы четко можем выделить совпадающие следы по значению максимума функции корреляции выше 0,45 и по наличию кластера, содержащего свыше 45% ячеек от общего количества.

Заключение

В ходе работы было показано, что применение метода корреляционных ячеек позволяет максимально выделить следы патронного упора и тем самым повысить чувствительность корреляционного анализа.

Также был определен дополнительный признак схожести следов в виде кластерности распределения максимумов корреляции ячеек на диаграмме сдвигов.

В итоге были получены следующие критерии признания изображений схожими: коэффициент корреляции выше 0,45 и на диаграмме сдвигов присутствует кластер (свыше 45% всех точек должны быть сосредоточены в одной области).

Таким образом, данный метод может быть применен для автоматической фильтрации следов из электронных баз данных. Поскольку

электронные базы данных изображений следов на стреляных гильзах могут включать в себя десятки тысяч однотипных изображений, то этот метод значительно упростит проведение проверок. При этом предлагается, наряду с базой данных полных следов, сформировать базу данных следов патронного упора с удаленными областями.

Дальнейшие исследования следует вести по направлению дополнительного анализа морфологии признаков, так как без этого представляется невозможной дифференциация следов, оставленных разными экземплярами оружия, имеющими одинаковые подгрупповые характеристики.

Список литературы

1. Song J. Proposed “Congruent Matching Cells (CMC)” Method for Ballistic Identification and Error Rate Estimation // AFTE Journal. 2015. Vol. 47, № 3. P. 177–185.
2. Song J. Proposed “NIST Ballistics Identification System (NBIS)” Based on 3D Topographic Measurements on Correlation Cells // AFTE Journal. 2013. Vol. 45, № 2. P. 184–194.
3. Сорокина К. О., Федоренко В. А., Гиверц П. В. Оценка схожести изображений следов патронного упора методом корреляционных ячеек // Информационные технологии и вычислительные системы. 2019. № 3. С. 3–15. DOI: 10.14357/20718632190301
4. Кокин А. В., Ярмач К. В. Судебная баллистика и судебно-баллистическая экспертиза : учебник. М. : Юнити-Дана, 2015. 351 с.
5. Волкова М. А., Луцив В. П. Методы обработки и распознавания изображений : учеб.-метод. пособие по лабораторному практикуму. СПб. : Университет ИТМО, 2016. 40 с.
6. Gonzalez R. C., Woods R. E., Eddins S. L. Digital Image Processing Using MATLAB. L. : Gatesmark Publishing, 2009. 827 p.
7. Zalewski E. N. Mathematics in Forensic Firearm Examination. Syracuse : Syracuse University SURFACE, 2015. 72 p.

Образец для цитирования:

Сорокина К. О., Федоренко В. А., Гиверц П. В. Выявление схожих изображений следов патронного упора методом корреляционных ячеек // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Экономика. Управление. Право. 2020. Т. 20, вып. 2. С. 203–209. DOI: <https://doi.org/10.18500/1994-2540-2020-20-2-203-209>

Identification of Similar Images of Breech Face Impressions by the Correlation Cells Method

K. O. Sorokina, V. A. Fedorenko, P. V. Giverts

Ksenia O. Sorokina, <https://orcid.org/0000-0003-1071-1298>, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politechnicheskaya St., Saratov 410054, Russia, lorredos@gmail.com

Vladimir A. Fedorenko, <https://orcid.org/0000-0002-3979-2602>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, fed77@yandex.ru

Pavel V. Giverts, <https://orcid.org/0000-0002-4019-5055>, Division of Identification and Forensic Science, National Police HQ, Haim Bar-Lev road, Jerusalem 91906, Israel, pavel.giverts@gmail.com



Introduction. The current task of forensic ballistic identification is to investigate the breech face impressions on the firing cartridge cases. The paper deals with comparison of images of breech face impressions by correlation cells method. **Theoretical analysis.** Similarity of images of investigated impressions can be established by a method of the correlation analysis. However, this method is ineffective, because the correlation coefficient is dominated by areas that do not contain useful information. To improve the efficiency of correlation analysis, J. Song proposed a method of congruent matching cells. The method of correlation cells is based on this method. The paper presents the algorithm of the method, broken down into the main stages. The first stage includes preliminary processing of the image and splitting it into cells. The second stage is building the distribution of the maximums of correlation coefficients. The third stage is to establish the presence of the cluster in the graph of this distribution. The fourth stage allows to identify areas valid for further work. The method of selecting areas that do not contain breech face impressions is based on finding the autocorrelation function. In the fifth stage, the final value of the correlation coefficient is calculated without taking into account the areas of the analyzed images that do not contain useful information. **Experimental research.** Two conditions were proposed as criteria for similarity of the breech face impressions. The first one is a high value of the correlation coefficient. The second is the presence of the cluster on the graph of maximum correlation coefficient distribution. The verification of this fact is based on the identification of the likelihood coefficient. **Conclusion.** The method of correlation cells made it possible to increase the efficiency of the correlation analysis. In the course of the work, the criteria for attributing impressions to the category of similar ones were defined.

Keywords: breech face impressions, correlation cells method, CMC method, correlation analysis, likelihood coefficient.

Received: 17.11.2019 / Accepted: 10.01.2020 / Published: 01.06.2020

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

References

1. Song J. Proposed “Congruent Matching Cells (CMC)” Method for Ballistic Identification and Error Rate Estimation. *AFTE Journal*, 2015, vol. 47, no. 3, pp. 177–185.
2. Song J. Proposed “NIST Ballistics Identification System (NBIS)” Based on 3D Topographic Measurements on Correlation Cells. *AFTE Journal*, 2013, vol. 45, no. 2, pp. 184–194.
3. Sorokina K. O., Fedorenko V. A., Giverts P. V. Evaluation of the Similarity of Images of Breech Face Marks Using the Method of Correlation Cells. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy* [Information Technologies and Computing Systems], 2019, no. 3, pp. 3–15. DOI: 10.14357/20718632190301 (in Russian).
4. Kokin A. V., Yarmak K. V. *Sudebnaya ballistika i sudebno-ballisticheskaya ekspertiza* [Forensic ballistics and forensic ballistic examination]. Moscow, Yuniti-Dana Publ., 2015. 351 p. (in Russian).
5. Volkova M. A., Lutsiv V. R. *Metody obrabotki i raspoznavaniya izobrazhenij. Uchebno-metodicheskoe posobie po laboratornomu praktikumu* [Methods of image processing and recognition. Teaching aid for laboratory practice]. St. Petersburg, Universitet ITMO Publ., 2016. 40 p. (in Russian).
6. Gonzalez R. C., Woods R. E., Eddins S. L. *Digital Image Processing Using MATLAB*. London, Gatesmark Publishing, 2009. 827 p.
7. Zalewski E. N. *Mathematics in Forensic Firearm Examination*. Syracuse, Syracuse University SURFACE, 2015. 72 p.

Cite this article as:

Sorokina K. O., Fedorenko V. A., Giverts P. V. Identification of Similar Images of Breech Face Impressions by the Correlation Cells Method. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Economics. Management. Law*, 2020, vol. 20, iss. 2, pp. 203–209 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1994-2540-2020-20-2-203-209>
